

**РАСЧЕТ ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛЕДЯНЫХ ГЕКСАГОНАЛЬНЫХ КРИСТАЛЛОВ,
ХАРАКТЕРНЫХ ДЛЯ ПЕРИСТЫХ ОБЛАКОВ, ВЫПОЛНЕННЫЙ В ПРИБЛИЖЕНИИ
ФИЗИЧЕСКОЙ ОПТИКИ**

В.А. Шишко^{1,2}, А.П. Попов¹, К.А. Давыдов¹

Научный руководитель: д.ф.-м.н. А.В. Коношонкин^{1,2}

¹Национальный исследовательский Томский государственный университет

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 36, 634050;

²Институт оптики атмосферы имени В.Е. Зуева СО РАН,

Россия, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1, 634055

E-mail: sva@iao.ru

**CALCULATION OF OPTICAL PROPERTY OF HEXAGONAL ICE CRYSTALS TYPICAL FOR
CIRRUS CLOUDS WITHIN THE PHYSICAL OPTICS APPROXIMATION**

V.A. Shishko^{1,2}, A.P. Popov¹, K.A. Davydov¹

Scientific Supervisor: Dr. A.V. Konoshonkin^{1,2}

¹National Research Tomsk State University, Russia, Tomsk, Lenina Avenue, 36, 634050;

²V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics, SB RAS, Russia, Tomsk, Academician Zuev sq., 1, 634055

E-mail: sva@iao.ru

Abstract. The paper presents optical characteristics obtained using the normal distribution and the gamma distribution laws with respect to the distortion angle of the hexagonal ice columns. The results are obtained within the physical optics approximation for hexagonal ice columns with lengths of 10, 31.62, 100, 316.23, 562.34, 1000 microns and diameters of 7, 22.14, 69.6, 123.77, 165.05 and 220.09 microns, respectively. The calculations were carried out for the wavelengths of 532 and 1064 nm, the refractive index was assumed to be 1.3116 and 1.3004, respectively. The distortion angle of the right dihedral angle ran within the range of 0° (regular particle) to 10°. The results obtained using the chosen model of column shape distortion showed better agreement with experimental observations, as compared to the calculations obtained for regular columns.

Введение. Перистые облака существенно влияют на процесс переноса солнечной энергии и, как следствие на формирование климата нашей планеты. Теоретическое решение задачи рассеяния света на частицах характерных для перистых облаков является необходимым для интерпретации лидарного сигнала. Оно позволяет значительно повысить качество восстанавливаемой информации, что является необходимым для улучшения качества прогноза погоды, а также объяснения явлений, происходящих в атмосфере.

Методы исследования. Наиболее приемлемым методом теоретического решения задачи рассеяния света на кристаллических частицах характерных для перистых облаков является приближение физической оптики, разработанное в ИОА СО РАН [1]. В данной работе представлены оптические характеристики идеальных и искаженных ледяных гексагональных столбиков. Оптические характеристики были получены из матриц обратного рассеяния света [2] рассчитанных в приближении физической оптики. Матрицы обратного рассеяния рассчитывались для идеальных и искаженных гексагональных столбиков высотой 10; 31,62; 100; 316,23; 562,34 и 1000 мкм, диаметром 7; 22,14; 69,6;

123,77; 165,05 и 220,09 мкм, которые соответствуют экспериментально установленной зависимости [3]. Расчеты проводились для длин волн 0,532 и 1,064 мкм, показатель преломления полагался равным 1,3116 и 1,3004, соответственно. Угол искажения ξ прямого двугранного угла столбика изменялся в диапазоне от 0° (идеальная частица) до 10° согласно модели, предложенной в работе [4].

Результаты. В качестве примера оптических характеристик представлены лидарное и деполаризационное отношения, которые определяются согласно следующим формулам:

$$LR = \frac{\sigma_e}{\sigma}; \quad \delta = \sigma_{\perp} / \sigma_{\parallel};$$

где LR – это лидарное отношение, σ_e – сечение экстинкции и δ является деполаризационным отношением, которое измеряется поляризационными лидарами, а σ_{\parallel} и σ_{\perp} – сечения обратного рассеяния для перпендикулярной и параллельной компонент относительно падающего линейно поляризованного света, усредненные по статистическому ансамблю кристаллов в облаке.

При усреднении рассчитанной матрицы обратного рассеяния света по нормальному закону распределения по углу искажения столбика использовалась следующие формулы:

$$\langle M_{ij}(\xi_{\text{eff}}) \rangle = C \cdot \int_0^{10} M_{ij} \cdot \exp[-(\xi - \mu)^2 / (2\xi_{\text{eff}}^2)] d\xi, \quad C = \left[\int_0^{10} \exp[-(\xi - \mu)^2 / (2\xi_{\text{eff}}^2)] d\xi \right]^{-1} \approx [\xi_{\text{eff}} \sqrt{2\pi}]^{-1},$$

где C – нормировочный коэффициент, M_{ij} – элемент матрицы Мюллера, ξ_{eff} – эффективный угол искажения граней кристалла, $\mu = 0$. В качестве примера на рис. 1 представлены результаты, полученные на длине волны 0,532 мкм.

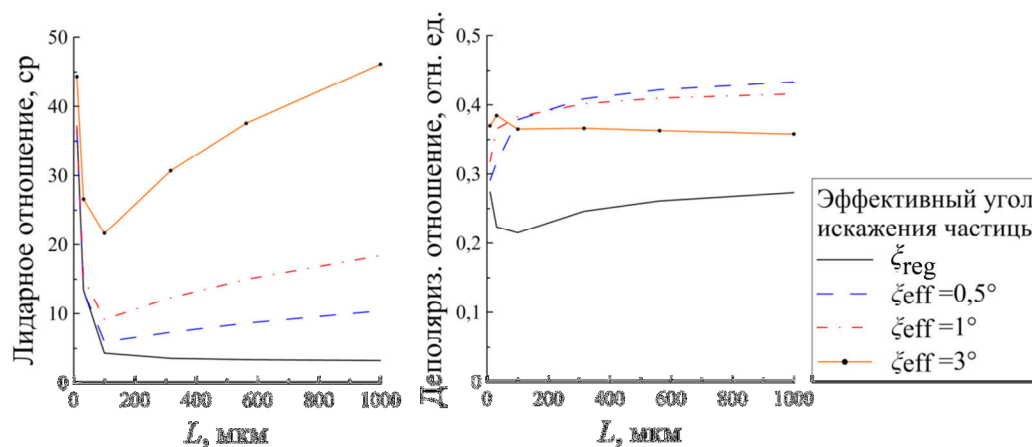


Рис. 1. Зависимость усредненных с использованием нормального закона распределения лидарного и деполаризационного отношений от длины столбика при разных эффективных углах искажения частицы. Длина волны 0,532 мкм. Кривая ξ_{reg} соответствует идеальным столбикам.

При усреднении рассчитанной матрицы обратного рассеяния света по гамма-распределению по углу искажения столбика использовалась следующая формула:

$$\langle M_{ij}(\xi_{\text{mod}}) \rangle = C \cdot \int_0^{10} M_{ij} \cdot \xi^{k-1} \frac{\exp(-\xi / \theta)}{\theta^k \Gamma(k)} d\xi, \quad C = \left[\int_0^{10} \xi^{k-1} \frac{\exp(-\xi / \theta)}{\theta^k \Gamma(k)} d\xi \right]^{-1},$$

где C является нормировочным коэффициентом, M_{ij} – элемент матрицы Мюллера, $\xi_{\text{mod}} = (k-1)\theta$ – модальный угол искажения граней кристалла, $\Gamma(k)$ – гамма-функция, $k=2$ параметр гамма-распределения. В качестве примера на рис. 2 представлены результаты, полученные на длине волны 1,064 мкм.

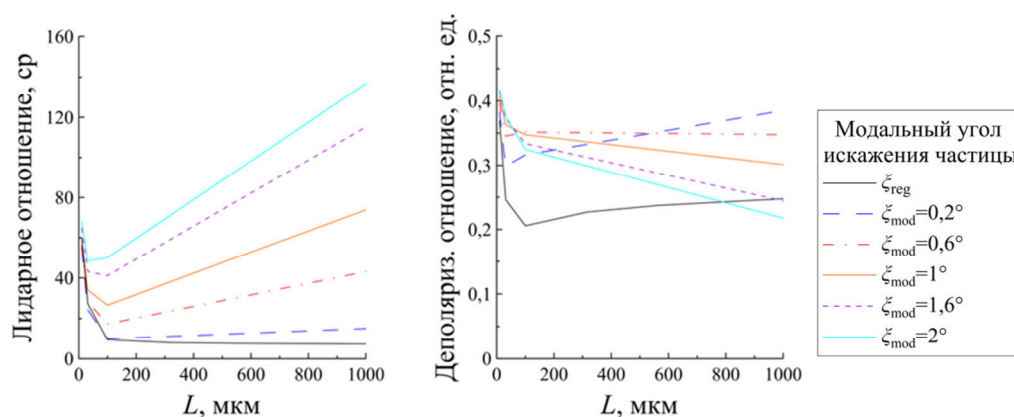


Рис. 2. Зависимость усредненных с использованием гамма-распределения лидарного и деполаризационного отношений от длины столбика при разных модальных углах искажения частицы.

Длина волны 1,064 мкм. Кривая ξ_{reg} соответствует идеальным столбикам

Экспериментальные наблюдения [5–6] оптических характеристик показывают следующие значения: для деполаризационного отношения – от 0,3 до 0,5 отн. ед. и для лидарного отношения – от 10 до 40 ср.

Сопоставление результатов экспериментальных наблюдений [5–6] с полученными в работе значениями оптических характеристик приводит к выводу, что искажение формы гексагональных столбиков позволяет добиться согласования экспериментальных наблюдений и полученных расчетов.

Заключение. Данные полученные с использованием выбранной модели искажения формы столбика, показали лучшее согласие с экспериментальными наблюдениями, по сравнению с расчетами, полученными для идеальных столбиков.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (16-35-60089, 18-05-00568, 18-55-53046) и грантов Президента РФ (МК-2495.2017.5 и НШ-8199.2016.5).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Borovoi A., Konoshonkin A., Kustova N. The physical-optics approximation and its application to light backscattering by hexagonal ice crystals // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. – 2014. – V. 146. – P. 181–189.
2. Самохвалов И.В., Кауль Б.В., Насонов С.В. и др. Матрица обратного рассеяния света зеркально отражающих слоев облаков верхнего яруса, образованных кристаллическими частицами, преимущественно ориентированными в горизонтальной плоскости // Оптика атмосферы и океана. – 2012. – Т. 25. – № 05. – С. 403–411.
3. Mitchell D.L. A model predicting the evolution of ice particle size spectra and radiative properties of cirrus clouds. Part 1. Microphysics // J. Atmos. Sci. – 1994. – V. 51. – P. 797–816.
4. Borovoi A., Kustova N., Konoshonkin A. Interference phenomena at backscattering by ice crystals of cirrus clouds // Opt. Express. – 2015. – V. 23. – P. 24557 – 24571.
5. Sassen K., Zhu J. A global survey of CALIPSO linear depolarization ratios in ice clouds: Initial findings // J. Geophys. Res. – 2009. – V. 114. – D00H07.
6. Kuehn R., Holz R., Eloranta E., etc. Developing a Climatology of Cirrus Lidar Ratios Using University of Wisconsin HSRL Observations // The 27th International Laser Radar Conference. – New York City, 2016. – V. 119. – id.16009.